

VŠB – Technická univerzita Ostrava  
Fakulta Strojní  
Institut dopravy

Kvalitativní analýza rizik formule SAE

Qualitative Risk Analysis of SAE Formula

Student: Jan Ogrocki  
Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Jan Famfulík, Ph.D.

Ostrava 2014

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta strojní  
Institut dopravy

## Zadání bakalářské práce

Student: **Jan Ogrocki**  
Studijní program: **B2341 Strojírenství**  
Studijní obor: **2301R003 Dopravní technika a technologie**  
Téma: **Kvalitativní analýza rizik formule SAE  
Qualitative Risk Analysis of SAE Formula**

Zásady pro vypracování:

1. Úvod
2. Analýza platných pravidel formule FSAE z hlediska rizik
3. Stanovení vhodných metod pro analýzu rizik
4. Provedení analýzy vybrané části formule FSAE a návrhy pro snížení rizik
5. Závěr

Seznam doporučené odborné literatury:

1. Pravidla formule FSAE 2013
2. Virtuální vzdělávání v dopravě, dostupné na:  
[http://issuu.com/michdor/docs/m11\\_text?e=7481937/2859112](http://issuu.com/michdor/docs/m11_text?e=7481937/2859112)
3. ČSN EN 60812: Techniky analýzy bezporuchovosti systémů – Postup analýzy způsobů a důsledků poruch (FMEA)
4. ČSN EN 61025: Analýza stromu poruchových stavů (FTA)

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Jan Famfulík, Ph.D.**

Datum zadání: 17.02.2014

Datum odevzdání: 19.05.2014



doc. Ing. Aleš Slíva, Ph.D.  
vedoucí katedry

doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.  
děkan fakulty

### **Místopřísežné prohlášení studenta**

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě ..... 1.10.2014 .....  
.....  
podpis studenta

## Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.

- беру на ве́домі́, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).

- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.

- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.

- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).

- беру на ве́домі́, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě .....1.10.2014.....

Podpis .....Jan Ogrocki.....

Jména a příjmení autora práce:

Jan Ogrocki

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Masarykova 158, Bohumín, 73581

# ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

OGROCKI, J. *Kvalitativní analýza rizik formule SAE: Bakalářská práce.*

Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Institut dopravy, 2014, 26s.

Vedoucí práce: doc. Ing. Jan Famfulík, Ph.D.

Bakalářská práce se zabývá analýzou rizik poruch systémů Formule Student a návrhům řešení pro snížení těchto rizik. Analýza je provedena metodou FMEA.

V teoretické části mé práce je analyzována část pravidel, která je věnována této problematice. Poté jsou uvedeny základní pojmy z oblasti bezpečnosti a popsány metody FMEA, FTA a ALARP.

V praktické části jsou metodou FMEA analyzovány ochranný rám a firewall, uvedeny možné poruchy a navržena opatření ke snížení rizik. Poté je provedena analýza zahrnující tato opatření. V závěru je uveden přehled všech navržených bezpečnostních opatření.

## ANNOTATION OF THESIS

OGROCKI, J. *Qualitative Risk Analysis of SAE Formula: Bachelor Thesis.*

Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Institute of Transport, 2014, 26 p. Thesis head: Famfulík, J.

The thesis presents a analysis of the risks of system failures in Formula Student and a proposals for solutions to minimaze these risks. Analysis is performed by FMEA.

In the theoretical part is analyzed part of the rules, which is devoted to this issue. Then there are the basic concepts of security and describes of methods FMEA, FTA and ALARP.

In the practical part are analyzed frame and firewall by FMEA analysis, noted list of possible faults and proposed measures to reduce the risks. Then is performed analysis involving thes measures. In conclusion is an overview of the proposed security measures.

# Obsah

Seznam zkratk .....	7
1 Úvod.....	8
2 Analýza platných pravidel formule FSAE z hlediska rizik .....	9
2.1 Definice pojmů .....	9
2.2 Základní materiálové požadavky .....	10
2.3 Ochranný rám prostoru jezdce .....	11
2.4 Nárazový pěnový blok .....	16
2.5 Sedadlo řidiče .....	16
2.6 Firewall .....	17
2.7 Viditelnost řidiče.....	17
3 Stanovení vhodných metod pro analýzu rizik.....	19
3.1 Pojmy v oblasti bezpečnosti .....	19
3.2 Analýza způsobů a důsledků poruch (FMEA).....	20
3.2.1 Postup provádění analýzy .....	21
3.3 Analýza stromu poruchových stavů (FTA) .....	23
3.3.1 Konstrukce stromu poruch.....	23
3.4 Metoda analýzy rizika ALARP.....	24
4 Analýza ochranného rámu Formule SAE .....	26
4.1 Analýza FMEA ochranného rámu .....	27
4.1.1 Výpočet RPN .....	29
4.1.2 Opakovaný výpočet RPN.....	31
5 Analýza firewallu.....	32
5.1 Výpočet RPN .....	32
5.2 Opakovaný výpočet RPN.....	33
6 Přehled navržených opatření.....	34
7 Závěr .....	35
Seznam použité literatury .....	36
Seznam obrázků a tabulek .....	36
Seznam příloh .....	37

## Seznam zkratek

ALARP	...	analýza rizika
CD	...	míra detekce poruchy
CO	...	pravděpodobnost poruchy
ČSN	...	česká technická norma
EN	...	evropská norma
ES	...	míra kritičnosti poruchy
FMEA	...	analýza způsobů a důsledků poruch
FSAE	...	Formule Student
FTA	...	analýza stromu poruchových stavů
RPN	...	hodnota významnosti poruch
SAE	...	Society of Automotive Engineers

# 1 Úvod

Cílem mé bakalářské práce je analýza rizik pro pilota, které s sebou přináší selhání bezpečnostních prvků Formule SAE, a vytvoření návrhů pro jejich eliminaci. Pro tuto analýzu budou použity metoda analýzy způsobů a důsledků poruch FMEA. V práci bude stručně popsána i metoda ALARP a metoda analýzy stromu poruchových stavů FTA.

Analýza FMEA je systematický postup analýzy systému, který má za účel zjistit potenciální způsoby poruch, jejich příčin a důsledků. Je to induktivní metoda, provádí tedy kvalitativní analýzu bezporuchovosti a bezpečnosti systému od nižší k vyšší úrovni členění systému a zkoumá, jakým způsobem mohou objekty na nižší úrovni selhat a jaký důsledek mohou mít tato selhání pro vyšší úroveň systému.

Formula SAE je soutěž, kterou organizuje SAE International, jejímž zaměřením je konstrukční vývoj. Vznikla v roce 1978 pod názvem SAE Mini Indy, v roce 1998 pak vznikla evropská soutěž s názvem Formula Student/SAE.

V rámci soutěže prezentují studenti na závodech prototyp vlastní vyvinuté formule, tyto závody se obvykle pořádají každý týden. Studenti, kteří vyvíjeli a testovali formule, si tak mohou porovnat vlastní umění a konstrukční schopnosti s ostatními týmy světa. V soutěži je zahrnuto porovnávání designu, dynamických a statických vlastností formule a testování jejích konstrukčních prvků. Dále se soutěž zaměřuje na testování spolehlivosti při dynamických zkouškách při testovacích jízdách a ověřování statických vlastností – konstrukční prvky a materiály, z nichž je formule vyrobena.



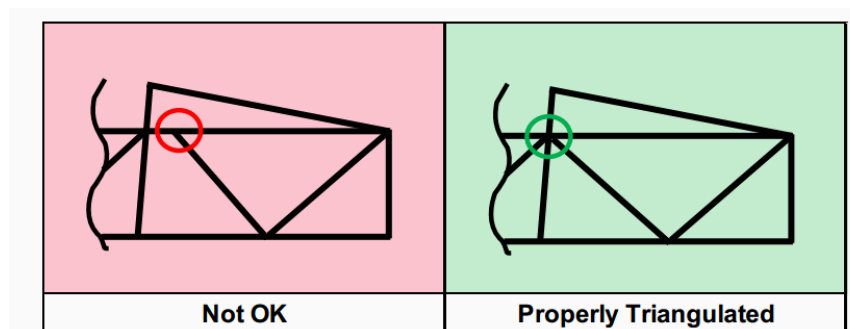
## 2 Analýza platných pravidel formule FSAE z hlediska rizik

Pravidla byly vydány společností SAE International v roce 2012.

### 2.1 Definice pojmů

- Hlavní oblouk – válcová tyč nacházející se po boku nebo těsně za trupem řidiče
- Přední oblouk – válcová tyč nacházející se nad nohama řidiče v blízkosti volantů
- Válcové oblouky – hlavní i přední oblouky jsou klasifikovány jako "válcové oblouky"
- Podpory vyztužující válcový oblouk – konstrukce z dolního konce vyztužení válcového oblouku zpět k válcovému oblouku.
- Člen rámu – jeden kus minimálního zástupce neodděleného, kontinuálního potrubí
- Rám – je vyrobená strukturální sestava, která nosí všechny funkční systémy vozidla. Tato sestava může být jednotná svařovaná konstrukce, více svařovaná konstrukce nebo kombinace kompozitních a svařovaných konstrukcí
- Primární struktura – Primární struktura je složená z následujících komponentů rámu: 1) Hlavní oblouk, 2) Přední oblouk, 3) Výztuha válcového oblouku a podpory, 4) Struktura proti bočnímu nárazu, 5) Přední přepážka, 6) Systém podpory přední přepážky a 7) všechny členy rámu, příček a podpor, které přenesou zatížení ze zádržného systému řidiče do položek 1 až 6.
- Hlavní konstrukce rámu – část rámu, která je zahrnuta v rámci definovaném primární strukturou. Horní část hlavního oblouku a hlavní oblouková výztuha nejsou v tomto zahrnuty.
- Přední přepážka – rovinná struktura, která definuje přední rovinu hlavní rámové struktury a funkce, které poskytují ochranu nohám řidiče.
- Nárazový pěnový blok – deformovatelné zařízení pohlcující energii umístěné před přední přepážku.

- Boční nárazová zóna – oblast na boku vozu vystupující z horní části podlahy do výšky 350mm nad zemí, mezi předním a hlavním obloukem.
- Node-to-node triangulace – uspořádání člena rámu promítaných do roviny, kde koplanární zatížení působící v rámu ve všech směrech, v každém uzlu, vede pouze k tahovým nebo tlakovým silám.



Obrázek 2.1: Správné uspořádání členů rámu [2]

## 2.2 Základní materiálové požadavky

Primární struktura vozu musí být vyrobena z kruhové, nízkolegované nebo legované ocelové trubky (minimálně o obsahu 0,1% uhlíku) minimálních rozměrů, jak je uvedeno v následující tabulce.

Aplikace	Vnější průměr x tloušťka stěny
Hlavní a přední oblouky	25.4 mm x 2.4 mm nebo 25.0 mm x 2.5 mm
Boční nárazová struktura, přední přepážka, podpory válcových oblouků	25.4 mm x 1.65 mm nebo 25.0 mm x 1.75 mm nebo 25.4 mm x 1.60 mm čtvercové průřezy: 25.4 mm x 25.4 mm x 1.25 mm nebo 25.0 mm x 25.0 mm x 1.25 mm nebo 26.0 mm x 26.0 mm x 1.2 mm

Podpora přední přepážky	25.4 mm x 1.25 mm nebo  25.0 mm x 1.5 mm nebo  26.0 mm x 1.2 mm
-------------------------	---

Tabulka 1: Minimální rozměry trubek [2]

## 2.3 Ochranný rám prostoru jezdce

Ochranný rám se skládá z několika částí.

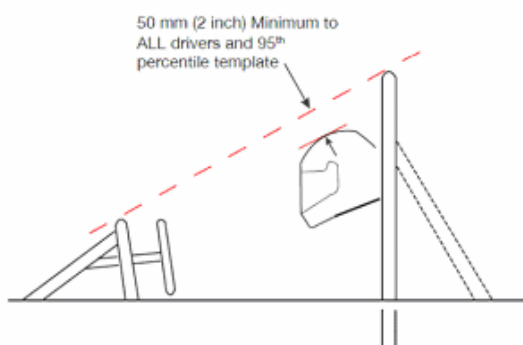
### Hlavní a přední oblouk – Všeobecné požadavky

Řidičova hlava a ruce se nesmí dotknout země v jakékoliv poloze po překlopení.

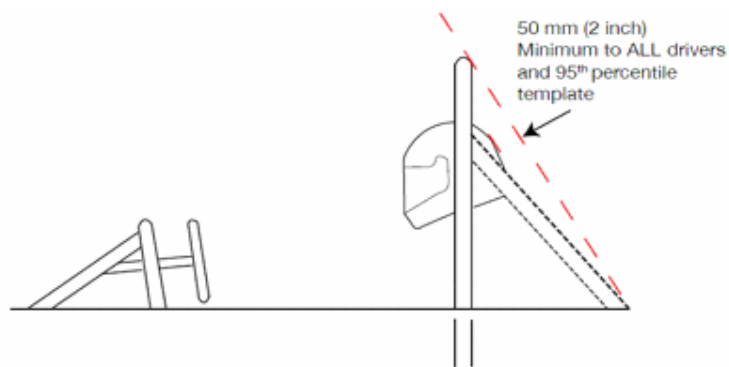
Rám musí zahrnovat hlavní oblouk a přední oblouk, jak je znázorněno na obrázcích 2.2 – 2.4.

Když řidič sedí normálně a je upoután v řidičově zádržném systému, helma musí:

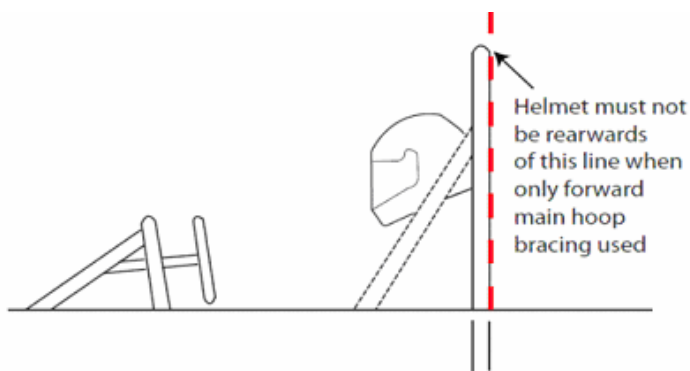
- Být vzdálena minimálně 50,8 mm od přímky vedené z nejvyššího místa hlavního oblouku k nejvyššímu místu předního oblouku. (Obr. 2.2)
- Být vzdálena minimálně 50,8 mm od přímky vedené z nejvyššího místa hlavního oblouku k nejspodnějšímu konci výztuhy hlavního oblouku, pokud vzpěry směřují dozadu. (Obr. 2.3)
- Nesmí být za zadní plochou hlavního oblouku v případě, že vzpěry hlavního oblouku směřují dopředu. (Obr. 2.4)



Obrázek 2.2: Vzdálenost helmy od přímky z nejvyššího místa hlavního oblouku k nejvyššímu místu předního oblouku [2]



Obrázek 2.3: Vzdálanost helmy od přímky z nejvyššího místa hlavního oblouku k nejspodnějšímu konci výztuhy hlavního oblouku [2]



Obrázek 2.4: Maximální zadní poloha helmy [2]

### **Hlavní oblouk**

Hlavní oblouk musí být vyroben z jednoho kusu neděleného, kontinuálního, uzavřeného ocelového potrubí dle 2.2.

Musí vést z nejnižšího bodu rámu z jedné strany rámu nahoru, nad vozem a dolů na nejnižší bod rámu na druhé straně rámu.

Z bočního pohledu na vozidlo musí být část hlavního oblouku, která leží nad jeho upevňovacím bodem k hlavní konstrukci rámu, do 10° od vertikály.

Z čelního pohledu vozidla musí být vertikální členy hlavního oblouku vzdáleny od sebe alespoň 380 mm (vnitřní rozměr) v místě, kde je hlavní oblouk připojen k hlavní konstrukci rámu.

### **Přední oblouk**

Přední oblouk musí být vyroben z uzavřené kovové trubky.

Nejvyšší pozice povrchu předního oblouku nesmí být nižší než horní část volantu v jakékoliv poloze natočení.

Přední oblouk nesmí být více než 250 mm před volantem. Tato vzdálenost se měří ve vodorovné poloze na ose vozidla, ze zadního povrchu předního oblouku k nejpřednějšímu povrchu věnce volantu s volantem v poloze pro přímou jízdu.

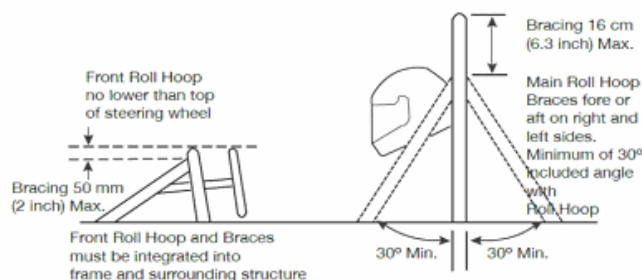
Z bočního pohledu nesmí být žádná část předního oblouku nakloněna více než 20° od vertikály.

### **Vzpěry hlavního ochranného oblouku**

Vzpěry hlavního ochranného oblouku musí být vyrobené z uzavřených profilů.

Při bočním pohledu musí být dvojice vzpěr umístěna na tu stranu, kam se naklání hlavní ochranný oblouk (dopředu nebo dozadu) a musí ho podepírat na pravé i levé straně.

Jedny konce vzpěr musí být uchyceny co nejbližší k vrcholu hlavního ochranného oblouku do maximální vzdálenosti 160 mm. Úhel, který s ním svírají, musí být minimálně 30° (viz obr. 2.5).



Obrázek 2.5: Vzpěry hlavního a předního oblouku [2]

Musí být rovné bez záhybů.

Musí být schopny bezchybně přenášet zatížení z hlavního oblouku do hlavní konstrukce rámu. Proto musí být spodní konce vzpěr pomocí triangulace profilů upevněny ke spodním koncům hlavního ochranného oblouku a uzlovému bodu profilů

pro ochranu při bočním nárazu. Zatížení ze vzpěr nesmí být přenášeno na motor, převodovku, diferenciál nebo prvky odpružení.

Pokud je některá položka, která se nachází mimo primární strukturu, připojena ke vzpěrám, musí být přidáno další vyztužení pro zabránění ohybového zatížení ve vzpěrách v případě převrácení vozidla.

### **Vzpěry předního oblouku**

Vzpěry musí být vyrobeny z uzavřené kovové trubky.

Přední oblouk musí být podpořen dvěma výztuhami směrem dopředu na levé i pravé straně.

Výztuhy musí být konstruovány tak, aby chránily řidičovy nohy a měly by vést před chodidly řidiče.

Musí být připojeny co nejblíže k nejvyšší části předního oblouku, ale ne více než 50.8 mm pod nejvyšší horním povrchem oblouku (viz obr. 2.5).

Pokud přední oblouk vede dozadu pod úhlem více než 10° od vertikály, musí být podpořen směrem dozadu dalšími výztuhami.

### **Čelní nárazová struktura**

Pilotovy chodidla a nohy musí být kompletně umístěny v hlavní konstrukci rámu. Když se pilotovy chodidla dotýkají pedálů, v bočním a předním pohledu nesmí žádná část pilotových chodidel nebo nohou vyčnívat nad nebo mimo hlavní konstrukci rámu.

Před přední přepážkou musí být nárazový blok pohlcující energii.

### **Přepážka**

Přední přepážka musí být zkonstruována z uzavřeného úseku potrubí.

Musí být umístěna před všemi nezdeformovatelnými objekty, jako např. baterie, hlavní brzdové válce, hydraulické rezervoáry.

Musí být umístěna tak, aby chodidla pilota, když se dotýkají pedálů, ale nesešlapují je, byly směrem dozadu od roviny přepážky (tato rovina je definována

nejpřednějším povrchem potrubí). Nastavitelné pedály musí být v poloze nejvíce vpředu.

### **Podpora přední přepážky**

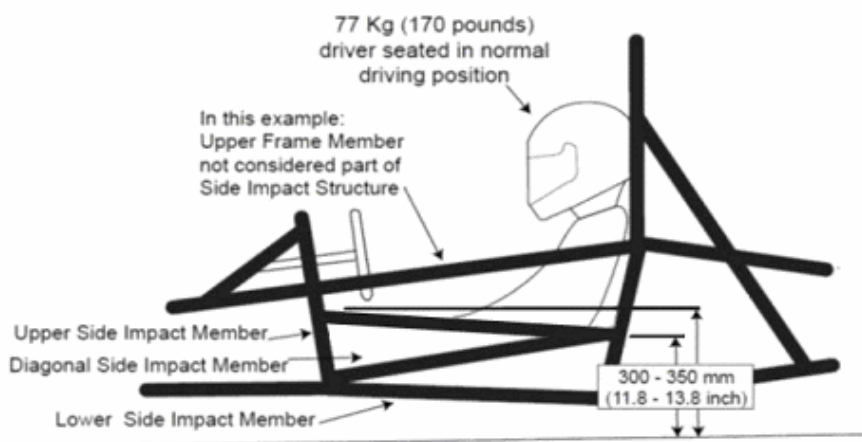
Přední přepážka musí být pevně integrována do rámu.

Přepážka musí být podepřena směrem k přednímu válcovému oblouku minimálně třemi členy rámu na každé straně vozidla; s jedním nahoře (v toleranci 50,8 mm od jeho nejvýše položené plochy), jeden na dně a jeden jako diagonální vzpěra poskytující triangulaci.

Všechny členy rámu systému vzpěr přední přepážky uvedené výše musí být vyrobeny z uzavřených úseků potrubí.

### **Boční nárazová struktura**

Boční nárazová struktura musí být složena nejméně ze tří trubkových členů nacházejících se na každé straně od řidiče sedícího v normální poloze pro řízení, jak je znázorněno na obr. 2.6.



Obrázek 2.6: Boční nárazová struktura [2]

Umístění požadovaných trubkových členů jsou následující:

- Horní člen musí spojovat hlavní a přední oblouk. S řidičem o hmotnosti 77 kg usazeným v normální poloze pro řízení musí být každý člen ve výšce mezi 300 až 350 mm nad zemí.

- Spodní člen musí být připojen k dolní části hlavního oblouku a dolní části předního oblouku.
- Úhlopříčný člen musí spojit horní člen vzadu s hlavním obloukem a dolní člen vpředu s předním obloukem.

## 2.4 Nárazový pěnový blok

Nárazový pěnový blok musí být:

- Instalován před přední přepážkou
- Nejméně 200 mm dlouhý, s délkou orientovanou podél (od přídi k zádi) osy rámu.
- Nejméně 100 mm vysoký a 200mm široký pro minimální vzdálenost 200 mm před přední přepážkou.
- Takový, že nemůže proniknout do přední přepážky v případě nárazu.
- Bezpečně upevněn přímo k přední přepážce, nemá být součástí nenosné karoserie.

## 2.5 Sedadlo řidiče

Nejnižší bod sedadla řidiče nesmí být níže než spodní povrch spodní části rámu nebo musí být sedadlo uloženo tak, že podélná trubka (nebo trubky), která splňuje požadavky na trubky boční nárazové struktury, prochází pod nejnižším bodem sedadla.

Při usazení řidiče v poloze pro řízení musí být zajištěna přiměřená tepelná izolace tak, aby řidič nepřišel do styku s žádným kovem nebo jinými materiály, které se mohou na povrchu zahřát nad 60 °C. Izolace může být externě vzhledem ke kokpitu nebo uvnitř u sedadla řidiče nebo firewallu. Návrh řešení musí zahrnovat všechny 3 druhy přenosů tepla, to znamená vedení, konvekce a radiace mezi zdroji tepla, například výfukového potrubí nebo chladicí hadice/trubky a panelu, se kterým může řidič přijít do kontaktu, např. sedadlo nebo podlaha.

- Izolace vedení:
  - žádný přímý kontakt mezi zdrojem tepla a panelem, nebo



- tepelně odolný, nevodivý izolační materiál s minimální tloušťkou 8 mm mezi zdrojem tepla a panelem
- Izolace konvekce:
  - minimální vzduchová mezera 25 mm mezi zdrojem tepla a panelem
- Izolace záření:
  - pevný kovový tepelný štít o minimální tloušťce 0,4 mm, nebo reflexní fólie nebo pásy v kombinaci s prvním bodem a druhou odrážkou.

## 2.6 Firewall

Firewall musí oddělit prostor řidiče od všech částí dodávek paliva, oleje v motoru a kapalinových chladících systémů. Musí chránit krk nejvyššího řidiče. Musí být rozšířen dostatečně vysoko a/nebo dozadu tak, že žádný bod nižší než 100 mm nad dolní částí helmy nejvyššího řidiče nesmí být umístěn v přímé linii viditelnosti s jakoukoli částí palivového systému, chladícího systému nebo systému motorového oleje.

Firewall musí být nepropustná plocha z tuhého, žáruvzdorného materiálu.

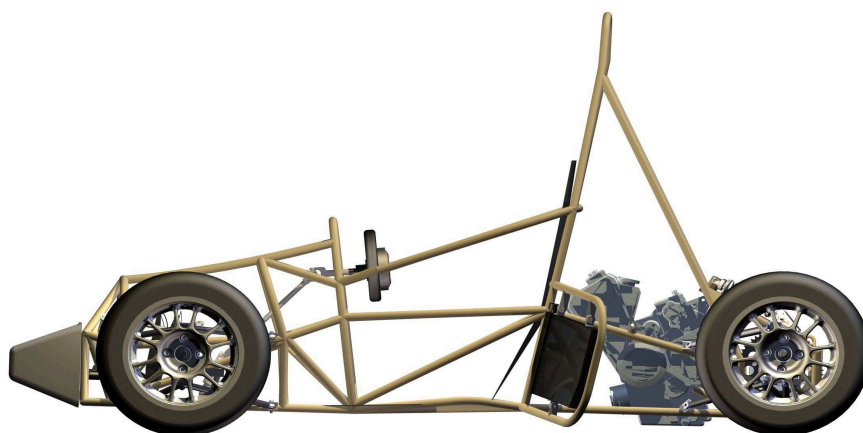
Každý firewall musí být zcela uzavřen proti průtoku tekutin, zejména po stranách a na podlaze kokpitu, tj. nemůžou být ve firewallu žádné otvory, přes které projdou bezpečnostní pásy.

Průchodky pro kabely elektroinstalace, apod. jsou přípustné, pokud kabelové vývodky slouží k utěsnění průchodů. Také může být použito více panelů pro vytvoření firewallu, ale musí být ve spojích utěsněny.

## 2.7 Viditelnost řidiče

Obecný požadavek - Řidič musí mít dostatečnou viditelnost na přední a bočních stranách vozu. Při sezení v normální poloze pro řízení musí mít řidič minimální zorné pole 200° (minimálně 100° na jedné straně řidiče). Požadovanou viditelnost může získat otáčením hlavy nebo použitím zrcátek.

Zrcátka - Pokud jsou zrcátka nutná, musí zůstat na svém místě a být upravena tak, aby umožnila potřebnou viditelnost ve všech případech. [2]



Obrázek 2.7: Počítačový model formule, boční pohled [1]

### 3 Stanovení vhodných metod pro analýzu rizik

Během návrhu a vývoje složitých technických systémů je nutné provést systémovou analýzu, jejíž cílem je posouzení spolehlivosti a bezpečnosti a následné provedení opatření pro eliminování rizik v budoucím provozu.

Během 20. století byla vyvinuta řada metod prediktivní analýzy technických systémů a procesů. Tyto metody podle přístupu při provádění analýzy patří do jedné ze dvou skupin: k induktivním nebo deduktivním metodám. [3]

Induktivní metody jsou charakteristické prováděním analýzy od nižších úrovní systému k vyšším, až k úrovni systému jako celku. Jejich výsledkem bývá výčet možných poruchových stavů systému a možných důsledků pro provoz systému. Nejvyužívanější induktivní metodou je v současnosti metoda FMEA – Analýza způsobů a důsledků poruch.

Naopak u deduktivních metod analýza probíhá od vyšších úrovní systému k nižším, tedy od systému jako takového až na úroveň prvků, kterými je systém tvořen. Provádí se za účelem nalezení příčin jednotlivých poruchových stavů, čili přesné stanovení toho, jak a za jakých podmínek může dojít k poruše systému. Často využívanou metodou je metoda FTA – Analýza stromu poruchových stavů.

U technických systémů je vhodné provádět kvalitativní analýzy vycházející z obou přístupů. Nejprve je induktivní metodou zjištěno, jakým způsobem dojde k poruše systému a klasifikací důsledků poruch mohou být určeny způsoby poruch, které by mohly ohrozit bezpečnost provozu systému. Pro tyto kritické poruchy se pak použije deduktivních metod ke stanovení příčin těchto poruch a faktorů přispívajících k jejich vzniku. Výsledky analýz pak vedou k návrhům opatření zamezujících vzniku nebezpečných poruch nebo včasným a spolehlivým odhalením.

#### 3.1 Pojmy v oblasti bezpečnosti

V oblasti bezpečnosti se setkáváme s těmito pojmy:

- bezpečnost – odstranění nepřijatelného rizika
- riziko – kombinace pravděpodobnosti výskytu poškození a závažnosti tohoto poškození

- poškození – fyzické zranění nebo poškození zdraví lidí buď přímo nebo nepřímou v důsledku ztráty/zhoršení vlastností nebo prostředí
- nebezpečí – potenciální zdroj poškození [5]
- objekt – jakákoliv část, součást, zařízení, subsystém, funkční jednotka, zařízení nebo systém, se kterým je možné se individuálně zabývat
- porucha – ukončení schopnosti objektu plnit požadovanou funkci
- poruchový stav – stav objektu charakterizovaný neschopností plnit požadovanou funkci, kromě neschopnosti během preventivní údržby nebo jiných plánovaných činností nebo neschopnosti způsobené nedostatkem vnějších zdrojů
- důsledek poruchy – následek způsobu poruchy pro provoz, funkci nebo stav objektu
- způsob poruchy – způsob, jakým u objektu dochází k poruše
- kritičnost poruchy – kombinace závažnosti důsledku a četnosti výskytu nebo jiných atributů poruchy jako míra potřeby zaměřit se na ně a zmírnit je
- systém – soubor vzájemně souvisejících nebo vzájemně působících prvků
- závažnost poruchy – významnost nebo stupeň důsledku způsobu poruchy na provoz objektu, na okolní prostředí objektu nebo na obsluhu objektu; je to závažnost důsledku způsobu poruchy vztahující se k vymezeným hranicím analyzovaného systému [4]

### **3.2 Analýza způsobů a důsledků poruch (FMEA)**

Metoda FMEA je strukturovaná, kvalitativní analýza, která slouží k identifikaci způsobů poruch systémů, jejich příčin a důsledků. Řídí se normou ČSN EN 60812.

K hlavním cílům metody patří:

- posouzení důsledků a posoupnosti jevů pro každý zjištěný způsob poruchy prvku, s jakoukoliv její příčinou, na různých funkčních úrovních systému.
- určení významnosti každého způsobu poruchy vzhledem k požadované funkci nebo provozuschopnosti systému s uvážením důsledků na bezporuchovost nebo bezpečnost daného procesu.

- klasifikace zjištěných způsobů poruch podle možnosti, jak lze zjistit, diagnostikovat, testovat, nahradit danou součást nebo provádět kompenzační a provozní opatření (oprava, údržba, logistický systém atd.) nebo podle jiných odpovídajících charakteristik.

- odhady ukazatelů významnosti a pravděpodobnosti poruchy, jsou-li k dispozici potřebná data.

Metoda se využívá hlavně při návrhu a vývoji, kde je součástí přezkoumání návrhu jako takzvaná metoda předběžného varování, která má za úkol zabránit pozdějším problémům vyplývajícím z nespolehlivosti systému. Dále nachází uplatnění při tvorbě koncepce a specifikace požadavků, jako nástroj předběžné analýzy rizik, a při modifikacích a modernizacích systému či při změnách provozních podmínek jako prostředek identifikace a posouzení důsledků konstrukčních změn a provozních podmínek na bezporuchovost a bezpečnost systému. Také se metoda používá při prokazování splňování požadavků norem, předpisů nebo uživatele navrhovaným systémem v oblasti bezporuchovosti a bezpečnosti.

Získané informace se mohou použít jako podklad pro návrh konstrukčních změn systému, stanovení požadavků na provedení zkoušek nebo označení nebezpečných provozních režimů. Výsledky analýzy také dávají potřebné informace pro správný návrh diagnostických postupů a systému údržby.

### **3.2.1 Postup provádění analýzy**

Pro provedení analýzy se musí vymezit podmínky jejího vykonání a získat potřebné vstupní informace, které jsou:

- technický popis systému
- definice rozhraní systému
- funkční členění systému
- definice funkcí systému a jeho prvků apod.

Při vlastní analýze se postupně všechny prvky systému (na zvolené nejnižší úrovni) podrobí systematickému zkoumání, při kterém se provedou tyto základní kroky:

- identifikace způsobů poruch prvku, jejich důsledků a pravděpodobných příčin,
- kvalitativní posouzení významnosti jednotlivých způsobů poruch,
- návrh opatření k zamezení vzniku poruch a jejich detekcí,
- posouzení účinnosti zavedených opatření opětovným provedením analýzy a její vyhodnocení.

Výstupem FMEA jednotlivých prvků je kvalitativní hodnocení úrovně spolehlivosti a bezpečnosti analyzovaného systému v podobě výčtu všech předpověditelných poruch, problémových míst v konstrukci a technologii a jejich důsledků pro funkci systému. Výsledky by měly mít setříděnou podobu, doplněnou o informace o pravděpodobných příčinách poruch, způsobech jejich identifikace apod. [3]

Pro klasifikaci rizika určité poruchy pro systém, čili jestli je pro provoz systému bezvýznamná nebo naopak ohrožuje například bezpečný provoz, je možno určit relativní významnost poruchy.

Významnost jednotlivých poruch může být hodnocena v analýze FMEA s využitím hodnoty RPN, která je dána jako součin hodnocení závažnosti důsledku poruchy, hodnocení četnosti příčin této poruchy a hodnocení možnosti detekce poruchy: [3]

$$RPN = ES \cdot CO \cdot CD$$

Rozsah stupnice klasifikace jednotlivých ukazatelů RPN je od 1 do 10, čím vyšší je hodnota ukazatele, tím je vyšší úroveň rizika nebo závažnosti poruchy. Vysoká hodnota ES představuje nebezpečný nebo kritický důsledek, nízká hodnota naopak nepatrný důsledek pro provoz systému. S rostoucí hodnotou CO se zvyšuje pravděpodobnost poruchy od téměř nemožné k téměř jisté, s rostoucí hodnotou CD klesá míra detekce poruchy od téměř jisté k nemožné.

Hodnota ukazatele významnosti RPN tedy nabývá hodnot v rozmezí 1 až 1000. Podle předem stanovených mezí může RPN připadnout do rozmezí, kdy je nutné provést opatření ke snížení rizika, nebo naopak není nutné provádět žádná opatření, případně mezi tato rozmezí, kdy o provedení opatření je nutno rozhodnout s přihlédnutím k dalším vlivům. [3]

### 3.3 Analýza stromu poruchových stavů (FTA)

Analýza stromu poruchových stavů je metodou speciálních orientovaných grafů. Strom poruch je logický diagram znázorňující logické vztahy mezi potenciální vrcholovou událostí a mezi příčinami vzniku tohoto jevu. Správně sestrojený strom poruch reprezentuje všechny kombinace poruch prvků a poruchových jevů, které mohou nastat a které mohou vést ke vzniku vrcholového jevu. Vrcholovou událost může představovat událost znamenající začátek vzniku nebezpečných podmínek, nebo událost představující neschopnost systému plnit požadované funkce.

Strom poruch je rozvíjen směrem k subsystémům, objektům a prvkům systému, jejichž porucha způsobuje vrcholovou událost. Do rozvoje jsou zahrnuty také vazby vnějších systémů, provozní a okolní podmínky, vliv lidského faktoru apod., jejichž možné kombinace mohou vést ke vzniku poruchy systému. [3]

#### 3.3.1 Konstrukce stromu poruch

Od poruchy systému je strom poruch rozvíjen k nižším úrovním systému, označovanými jako meziudálosti. Od meziudálosti je strom dále rozvíjen až k vzájemně nezávislým primárním událostem (např. poruchy prvků systému), jenž nelze dále rozvíjet a je možné určit jejich pravděpodobnost. Na obrázku 3.1 je vyznačeno grafické znázornění událostí.



Obrázek 3.1: Značení událostí ve stromu poruch [3]

Logické operace, kterými se provádí rozvoj stromu poruch, jsou v grafickém zápisu vyznačeny symboly hradel. Jejich značení je zobrazeno na obrázku 3.2.1.2. Logické operace jsou:

- konjukce (hradlo AND) – logický součin, tzn. výstupní událost nastane, nastanou-li všechny vstupní události,
- disjunkce (hradlo OR) – logický součet, tzn. výstupní událost nastane, dojde-li alespoň k jedné ze vstupních událostí,

- logika „m z n“ (výběrové hradlo) – výběrová logika, tj. výstupní událost nastane, nastane-li současně v libovolné kombinaci alespoň m vstupních událostí z n celkových, přičemž tuto logickou operaci je možné vyjádřit také pomocí operací vyjádřených pouze hradly AND a OR. [3]



Obrázek 3.2: Značení hradel ve stromu poruch [3]

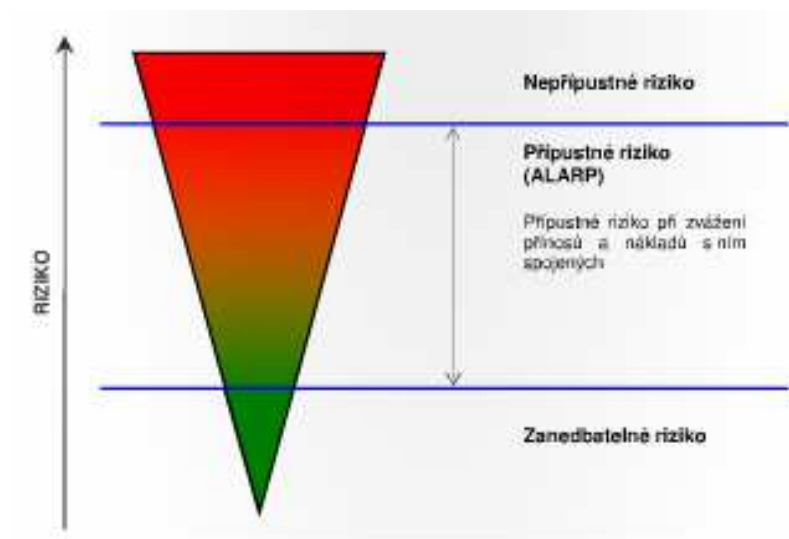
Kvalitativní hodnocení FTA má za cíl nalézt strukturní funkci stromu, tzn. vyjádření vrcholové události jako funkce jednotlivých prvků. Tuto funkci charakterizuje soubor minimálních řezů. Řez je nejmenší možná kombinace primárních událostí stromu, které vyvolají vrcholovou událost, pokud nastanou současně.

### 3.4 Metoda analýzy rizika ALARP

Metoda vychází z rozdělení rizika do tří skupin. Krajiní oblasti tvoří nepřípustné riziko, zanedbatelné riziko a v rozmezí mezi nimi je oblast přípustného rizika. To právě představuje oblast ALARP (as low as reasonably practicable, čili riziko na nejnižší rozumně proveditelné úrovni.

Cílem metody je snížit riziko na nejnižší možnou úroveň, s přihlédnutím k přínosům plynoucím z přijetí rizika a k nákladům spojeným se snížením rizika ve vztahu k dosaženému zlepšení bezpečnosti. [3]





Obrázek 3.3: Koncept metody ALARP [3]

Praktickou aplikací konceptu ALARP představuje hodnocení rizika s využitím tříd rizika, vycházející z principu kategorizace možných následků nebezpečných událostí a jejich předpokládané četnosti. [3]

Vyskytuje-li se riziko v nepřípustné oblasti, nemůže být daný objekt použit v provozu. Riziko musí být nejprve zmenšeno, a to minimálně do přípustné oblasti (ALARP). V nejnižší položené oblasti je riziko považováno za zanedbatelné a za přijatelné bez dalšího omezování. Je však třeba kontrolovat, zda setrvává na stejné úrovni. V přípustné oblasti může být riziko přijato nebo odmítnuto podle nákladů na jeho zmenšení nebo výhod, které jeho zanedbání přinese.

## 4 Analýza ochranného rámu Formule SAE

Vlastní analýzu rizik ochranného rámu jsem provedl analýzou FMEA. Jednotlivé části rámu jsou popsány v kapitole 1 této práce.

### Analýza nebezpečných událostí ochranného rámu

K vypracování analýzy posouzení funkční bezpečnosti jakéhokoliv systému je zapotřebí nejprve shromáždit základní údaje pro jednoznačnou identifikaci výrobku.

#### *Stručný popis*

Jedná se o konstrukci svařovanou z ocelových trubek, která nese všechny funkční systémy vozidla a chrání řidiče v případě nehody. Skládá se z hlavního a předního oblouku, jejich výztuh, čelní nárazové struktury, přední přepážky a boční nárazové struktury.

Dalším krokem bývá analýza možných nebezpečných událostí daného systému. To zahrnuje sestavení možných potenciálních poruch systému způsobujících ohrožení provozu, zdraví a životního prostředí. Dále nalezení potenciálních příčin vzniku těchto poruch a odhalení potenciálních následků.

#### *Analýza možných nebezpečných událostí:*

##### Možné potenciální poruchy:

- Vady ve svarech
- Prasklé trubky rámu
- Kontakt jezdce se zemí při překlopení

##### Možné potenciální příčiny:

- Nesprávný postup při svařování
- Složení základního materiálu
- Výrobní vady

- Nesprávný postup při ohýbání trubek
- Nesprávné rozměry oblouků
- Nesprávně ohnuté oblouky
- Náraz
- Nesprávná poloha hlavy jezdce

Možné potenciální následky:

- Snížení únosnosti rámu
- Vniknutí části rámu do prostoru jezdce
- Zranění hlavy a rukou při kontaktu se zemí

Posledním krokem pak je vyhodnocení závažnosti rizika nebezpečných událostí a stanovení vhodných opatření, které musí mít přímý vliv na hodnocení.

V případě ochranného rámu mají všechny případné poruchy za následek ohrožení zdraví a života jezdce. Zamezit těmto nebezpečným událostem lze důkladnou kontrolou.

## **4.1 Analýza FMEA ochranného rámu**

Informace o možných nebezpečných událostech využiji k provedení analýzy. Pro každou možnou potenciální poruchu jsem vypočetl číslo priority rizika RPN podle přiřazených tříd závažnosti, četnosti a odhalitelnosti – tab. č. 2, 3, 4. Jednotlivá kritéria jsem vyjádřil číselnou hodnotou a popisem. Třída č. 1 znamená nejmenší závažnost, nejmenší četnost a největší odhalitelnost poruchy, opakem je třída č. 10.

Třída	Závažnost	Kritéria
1	Žádná	Žádný důsledek
2	Zanedbatelná	Nezásadní chyba
3	Málo významná	Nemá vliv na jezdce
4	Velmi nízká	Téměř nemá vliv na jezdce
5	Nízká	Velmi malý vliv na jezdce
6	Střední	Malý vliv na jezdce
7	Vysoká	Rozptyluje jezdce
8	Velmi vysoká	Může způsobit nehodu
9	Nebezpečná	Ohrožení zdraví jezdce
10	Velmi nebezpečná	Ohrožení života jezdce

Tabulka č. 2: Třídy závažnosti poruch

Při určování četnosti jsem vycházel z předpokladu výskytu poruchy během životnosti systému. Porucha zařazená do třídy četnosti 1 má nejmenší pravděpodobnost výskytu, naopak porucha třídy 10 má velmi vysokou pravděpodobnost výskytu.

Třída	Četnost	Kritéria
1	Vzácná	Nepravděpodobný výskyt poruchy
2	Velice slabá	Malý výskyt poruchy
3	Slabá	
4	Nízká	
5	Střední	Občasný výskyt poruchy
6	Mírně zvýšená	Průměrný výskyt poruchy
7	Zvýšená	
8	Častá	Vysoká pravděpodobnost výskytu poruchy
9	Vysoká	
10	Velmi vysoká	Téměř jistý výskyt poruchy

Tabulka č. 3: Třídy četnosti poruch

Zařazením jednotlivých prvků systému do tříd odhalitelnosti stanovuji s jakou pravděpodobností lze odhalit poruchy těchto prvků, čili s jakou pravděpodobností je možno předem stanovenými postupy nebo pomůckami včas zjistit potenciální poruchy.

Třída	Odhalitelnost	Kritéria
1	Téměř jistá	Téměř jistá pravděpodobnost odhalení
2	Velmi vysoká	Velmi vysoká pravděpodobnost odhalení
3	Vysoká	Vysoká pravděpodobnost odhalení
4	Zvýšená	Zvýšená pravděpodobnost odhalení
5	Střední	Střední pravděpodobnost odhalení
6	Nízká	Nízká pravděpodobnost odhalení
7	Velmi nízká	Velmi nízká pravděpodobnost odhalení
8	Nepravděpodobná	Nepravděpodobné odhalení
9	Velmi nepravděpodobná	Velmi nepravděpodobné odhalení
10	Téměř vyloučená	Odhalení je téměř vyloučeno

Tabulka č. 4: Třídy odhalitelnosti poruch

#### 4.1.1 Výpočet RPN

V této kapitole provedu podrobnou analýzu ochranného rámu a vypočítám hodnoty RPN. Čím vyšší je tato hodnota, tím je důsledek rizika závažnější. Hodnota RPN nabývá hodnot od 1 do 1000. Ideálním stavem je dosažení hodnoty  $RPN = 1$ . Pokud hodnoty přesáhnou  $RPN = 100$ , je potřeba provést opatření k zamezení vzniku nebezpečných událostí.

Příklad výpočtu RPN pro vady ve svarech:

$$RPN = 10 \cdot 4 \cdot 7 = 280$$

Funkce	Potenciální porucha	Potenciální důsledky poruchy	E <sub>S</sub>	Potenciální příčiny	CO	Současný stav - kontrolní opatření	CD	RPN
Nese karoserii a základní skupiny vozidla	Vady ve svarech	Snížení únosnosti rámu	10	Nesprávný postup při svařování	4	Vizuální kontrola	7	280
				Chemické složení materiálu	4		7	280
	Prasklé trubky rámu	Snížení únosnosti, Vniknutí do prostoru jezdce	10	Výrobní vada	2	Vizuální kontrola	8	160
				Nesprávný postup při ohybu trubky	2		3	60
				Náraz	4		2	80
Chrání jezdce při překlopení, čelních a bočních nárazech	Kontakt se zemí při překlopení	Zranění hlavy a rukou jezdce	10	Nedostatečně ohnuté oblouky, nesprávné rozměry oblouků	1	Měření zaoblení a rozměrů	1	10
				Nesprávná poloha hlavy jezdce	2	Měření polohy hlavy	1	20

Tabulka č. 5: Analýza FMEA ochranného rámu

Z tabulky č. 5 vyplývá, že největší riziko přináší vady ve svarech. Je to způsobeno tím, že těchto vad existuje více druhů (např. horké a studené trhliny, neprůvary, vměstky apod.) a tyto navíc můžeme rozdělit na vady vnitřní a vnější (vnější - trhliny, vnitřní - vměstky). Z toho důvodu je snížená odhalitelnost vad při pouhé vizuální zkoušce.

Další riziko vyplývá z výrobních vad trubek, kdy trhliny v materiálu mohou vést až k prasknutí trubky. Opět je zde menší pravděpodobnost odhalení pouhou vizuální kontrolou.

Pro zvýšení odhalitelnosti těchto potenciálních poruch a tím snížení rizik z nich vyplývajících proto navrhuji provedení zkoušky ultrazvukem u jednotlivých trubek před sestavením konstrukce a po svaření pak provedení kapilárních zkoušek u jednotlivých svarů.

V ostatních případech se hodnota RPN pohybuje v optimálních mezích, není proto potřeba zavádět další preventivní opatření.

#### 4.1.2 Opakovaný výpočet RPN

Nyní provedu opětovnou analýzu FMEA s výše navrženými bezpečnostními opatřeními. Odhalitelnost poruch se tudíž zvýší a tím klesne hodnota RPN.

Funkce	Potenciální porucha	ES	Potenciální příčiny	CO	Doporučovaná preventivní opatření	Opatření k odstranění následků poruchy	CD	RPN
Nese karoserii a základní skupiny vozidla	Vady ve svarech	10	Nesprávný postup při svařování	4	Kapilární zkouška	Opětovné svaření	1	40
			Chemické složení materiálu	4			1	40
Chrání jezdce při překlacení, čelních a bočních nárazech	Prasklé trubky rámu	10	Výrobní vada	2	Zkouška ultrazvukem	Poškozený kus nepoužít	1	20

Tabulka č. 6: Opakovaná analýza FMEA ochranného rámu

Z provedené analýzy vyplývá, že po zavedení preventivních opatření hodnoty RPN nepřesahují 100, tudíž jsou opatření dostatečná a není zapotřebí dalších změn.

## 5 Analýza firewallu

Stejným způsobem jako u ochranného rámu provedu analýzu FMEA u firewallu. Požadavky na firewall jsou popsány v kapitole 2.6.

### *Stručný popis*

Jedná se o nepropustnou stěnu z tuhého, žáruvzdorného materiálu. Je umístěn za sedadlem a chrání jezdce před palivem, olejem a chladícími kapalinami.

### *Analýza možných nebezpečných událostí:*

#### Možná potenciální porucha:

- Kontakt řidiče s kapalinami

#### Možné potenciální příčiny:

- Prasklina
- Špatné umístění
- Netěsnost

#### Možný potenciální následek:

- Opaření jezdce

Selhání firewallu ohrožuje zdraví jezdce, předejít mu lze pečlivou kontrolou.

### 5.1 Výpočet RPN

Třídy závažnosti, četnosti a odhalitelnosti zůstávají stejné jako u rámu. Postup výpočtu je tedy totožný s předcházející kapitolou.



Funkce	Potenciální porucha	Potenciální důsledky poruchy	ES	Potenciální příčiny	CO	Současný stav - kontrolní opatření	CD	RPN
Chrání řidiče před pohonnými hmotami a provozními kapalinami	Kontakt řidiče s kapalinami	Opaření jezdce	9	Prasklina	3		7	189
				Špatné umístění	1	Měření správnosti umístění	2	18
				Netěsnost	3		7	189

Tabulka č. 7: Analýza FMEA firewallu

Z analýzy je zřejmé, že potenciálně nejnebezpečnější jsou netěsnosti a praskliny firewallu, jelikož jejich detekce je ztížena zakrytím firewallu sedadlem apod. Proto by bylo vhodné po každém závodě demontovat části zakrývající firewall a provést vizuální kontrolu povrchu a utěsnění firewallu.

## 5.2 Opakovaný výpočet RPN

Nyní opět provedu opakovaný výpočet RPN zahrnující navržené opatření vedoucí ke zvýšení odhalitelnosti poruchy.

Funkce	Potenciální porucha	ES	Potenciální příčiny	CO	Preventivní opatření	Opatření k odstranění následků poruchy	CD	RPN
Chrání řidiče před pohonnými hmotami a provozními kapalinami	Kontakt řidiče s kapalinami	9	Prasklina	3	Vizuální kontrola	Výměna poškozeného firewallu	1	27
			Netěsnost	3	Zkouška utěsnění	Utěsnění mezer	2	54

Tabulka č. 8: Opakovaná analýza FMEA firewallu

Po provedení opakované analýzy je zřejmé, že po zavedení ochranných opatření hodnota RPN klesla pod 100, není tudíž třeba dalších opatření.

## 6 Přehled navržených opatření

V této kapitole vypíši všechna navržená opatření pro zvýšení bezpečnosti.

Pro přehlednost jsem ve své práci uvedl pouze analýzu rámu a firewallu, analýzu zbylých částí naleznete v přílohách A, B a C.

### Ochranný rám:

– Kapilární zkouška svarů – Zkouškou lze odhalit vnitřní vady ve svarech, je tudíž účinnější než vizuální zkouška, proto ji doporučuji provést po svaření rámu. Vyskytne-li se nepřípustná vada, bude nutné svar opravit.

– Zkouška trubek ultrazvukem – Zkouškou se odhalí případné vnitřní vady v trubkách, které by časem mohly vést k porušení celistvosti a prasknutí trubek. Proveďte se před svařováním, aby se poškozené kusy mohly vyřadit.

### Firewall:

– Vizuální kontrola povrchu – Bude-li firewall něčím zakryt, bude zapotřebí tuto součást nejdříve demontovat, aby mohl být firewall prohlédnut. V závislosti na případném poškození pak bude nutné firewall opravit, případně vyměnit.

– Kontrola těsnění – Může být provedena zároveň s kontrolou povrchu. Případné netěsnosti pak musí být odstraněny.

### Sedadlo jezdce (viz příloha A):

– Kontrola dotažení šroubů – Z důvodu možného samovolného uvolnění šroubů doporučuji provést kontrolu dotažení před každým závodem.

– Zkouška tepelné izolace – Při stavbě formule navrhuji vyzkoušet funkčnost použité izolace. Nebude-li vyhovovat, je nutné ji buď zesílit nebo použít jiný typ.

### Nárazový blok (viz příloha B):

– Kontrola upevnění – uvolněný blok se upevní

– Vizuální kontrola povrchu – poškozený blok se vymění

Z důvodu špatného přístupu k nárazovému bloku se provedou obě kontroly současně.

## 7 Závěr

Tato bakalářská práce byla zaměřena na analýzu rizik Formule Student. Úkolem bylo nalézt možné poruchy vybraných systémů a jejich příčiny, stanovit míru rizika a navrhnout vhodná opatření pro eliminaci těchto poruch. Analýzy jednotlivých systémů jsem provedl metodou FMEA, která je velmi rychlá a je díky ní možné snadno identifikovat a posoudit potenciální poruchy systému. Je možné ji doplnit o případná další nalezené potenciální poruchy.

První část bakalářské práce zahrnuje popis jednotlivých částí formule, které byly analyzovány, podle platných pravidel SAE.

V další části práce jsou popsány metody používané pro analýzy rizik, čili metody FMEA, strom poruchových stavů FTA a metoda ALARP, a také vysvětlení pojmů v oblasti funkční bezpečnosti.

V praktické části mé práce byly analyzovány ochranný rám a firewall. Analýzy ostatních částí jsou uvedeny v přílohách. Nejprve byly určeny nebezpečné události. Poté byla provedena samotná analýza FMEA, ze které vyplynulo, které potenciální poruchy jsou nejrizikovější. V případě rámu jsou to vady svarů a výrobní vady trubek. U firewallu jsou to skryté praskliny a netěsnosti. Poté jsou uvedeny návrhy na včasné odhalení a tím snížení rizika těchto poruch, např. kapilární zkoušky svarů rámu, zkouška těsnosti firewallu apod. Následně byla provedena opakovaná analýza FMEA obsahující navržená opatření. Z té vyplynulo, že hodnoty priority rizika RPN klesly do optimálních hodnot (RPN menší než 100). Navržená opatření tedy jsou dostačující a není potřeba dalších změn. Závěrem byl uveden přehled všech navržených opatření.

## Seznam použité literatury

- [1] <http://formula.vsb.cz/fsae/>
- [2] <http://students.sae.org/cds/formulaseries/rules/2013fsaerules.pdf> citace 10.3.2014
- [3] Famfulík, J.; Hranoš, V.; Krzyžanek, R; Galvasová, Z.: Spolehlivost pozemní dopravy, dostupné na [http://issuu.com/michdor/docs/m11\\_text?e=7481937/2859112](http://issuu.com/michdor/docs/m11_text?e=7481937/2859112) citace 11.3.2014
- [4] ČSN EN 60812, Techniky analýzy bezporuchovosti systémů – Postup analýzy způsobů a důsledků poruch FMEA, Praha: Český normalizační institut, 2007, 43 str.
- [5] <https://www.tuev-sued.de/uploads/images/1219398444853429220004/Funkcni%20bezpecnost%2061508.pdf>
- [6] [http://u12133.fsid.cvut.cz/podklady/TE1/def\\_kontrola\\_sv.pdf](http://u12133.fsid.cvut.cz/podklady/TE1/def_kontrola_sv.pdf)
- [7] <http://www.odbornecasopisy.cz/uvod-do-funkcni-bezpecnosti-i:-norma-csn-en-61508-32520.html>

## Seznam obrázků a tabulek

- Obr. č. 2.1: Správné uspořádání členů rámu, str. 10
- Obr. č. 2.2: Vzdálenost helmy od přímky z nejvyššího místa hlavního oblouku k nejvyššímu místu předního oblouku, str. 11
- Obr. č. 2.3: Vzdálenost helmy od přímky z nejvyššího místa hlavního oblouku k nejspodnějšímu konci výztuhy hlavního oblouku, str. 12
- Obr. č. 2.4: Maximální zadní poloha helmy, str. 12
- Obr. č. 2.5: Vzpěry hlavního a předního oblouku, str. 14
- Obr. č. 2.6: Boční nárazová struktura, str. 17
- Obr. č. 2.7: Počítačový model formule, boční pohled. str. 18
- Obr. č. 3.1: Značení událostí ve stromu poruch, str. 23
- Obr. č. 3.2: Značení hradel ve stromu poruch, str. 23
- Obr. č. 3.3: Koncepce metody ALARP, str. 25

Tab. č. 1: Minimální rozměry trubek, str. 11
Tab. č. 2: Třídy závažnosti poruch, str. 28
Tab. č. 3: Třídy četnosti poruch, str. 28
Tab. č. 4: Třídy odhalitelnosti poruch, str. 29
Tab. č. 5: Analýza FMEA ochranného rámu, str. 30
Tab. č. 6: Opakovaná analýza FMEA ochranného rámu, str. 31
Tab. č. 7: Analýza FMEA firewallu, str. 33
Tab. č. 8: Opakovaná analýza FMEA firewallu, str. 33

## **Seznam příloh**

Příloha A – Analýza FMEA sedadla jezdce
Příloha B – Analýza FMEA nárazového bloku
Příloha C – Analýza FMEA zpětných zrcátek

## **Poděkování**

Tímto bych chtěl poděkovat panu doc. Ing. Janu Famfulíkovi, Ph.D a panu ing. Jakubu Šmirausovi za nesmírnou ochotu a trpělivost při konzultacích mé bakalářské práce.